

С.А. Клименко, д-р техн. наук, И.А. Петруша, д-р техн. наук,
М.Ю. Копейкина, канд. техн. наук, Ю.А. Мельничук, канд. техн. наук,
В.С. Муковоз, Киев, Украина

РАЗРАБОТКА ПСТМ НА ОСНОВЕ КНБ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Наведено результати досліджень по створенню полікристалічного надтвердого матеріалу (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (КНБ) та використанню різального інструменту, оснащеного ПНТМ, при обробці важкооброблюваних сплавів на основі Ni і Fe.

Представлены результаты исследований по разработке поликристаллического сверхтвердого материала (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) и применению режущего инструмента, оснащенного ПСТМ, при обработке труднообрабатываемых сплавов на основе Ni и Fe.

S.A. KLIMENKO, I.A. PETRUSHA, M.YU. KOPEJKINA, MEL'NIJCHUK JU.A., MUKOVOZ V.S. POLYCRYSTALLINE ULTRA-HARD MATERIAL DEVELOPMENT BASED ON CBN FOR WITH HIGH-PERFORMANCE EQUIPMENT CUTTING TOOLS

The results of researches are presented on development of polycrystalline ultra-hard material (PUHM) on the basis of cube нитрида бора of the coniferous forest (cBN) and application of toolpiece, equipped PSHM, at treatment of hard-processing alloys on the basis of Ni and Fe.

Введение. Анализ научно-технической литературы показывает, что наиболее эффективными материалами для оснастки режущего инструмента, предназначенного для обработки труднообрабатываемых сплавов высокой твердости, является ПСТМ на основе КНБ [1]. Интенсивное расширение использования в промышленности труднообрабатываемых сплавов обуславливает актуальность расширения исследований по повышению износостойкости инструмента с ПСТМ. При этом, нужно учитывать, что одной из наиболее важных мировых тенденций совершенствования процесса обработки является применение высоких скоростей резания [2], которые для труднообрабатываемых сплавов с коэффициентом обрабатываемости $K < 0,3$ составляют 80–250 м/мин.

Исследования, выполненные в ИСМ НАН Украины [3–5], показали, что перспективным путем повышения износостойкости режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, является снижение интенсивности физико-химического взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами с учетом влияния окружающей среды. За счет управляемого изменения механизма изнашивания инструмента, оснащенного сверхтвердыми композитами на основе КНБ, состав и свойства которых оптимизированы, исходя из условий контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания, можно существенным образом повысить эффективность обработки изделий из труднообрабатываемых сплавов.

В состав инструментального композита могут вводиться компоненты, которые, диссоциируя или вступая во взаимодействие с обрабатываемым материалом при термобарических условиях процесса резания, обеспечивают формирование в зоне резания среды, снижающей взаимодействие между контактирующими материалами. С учетом правила Ле Шателье, такой средой может быть азот. При этом, взаимодействие добавки в составе ПСТМ с элементами обрабатываемого материала должно происходить при температурах более низких, чем температуры, характерные для взаимодействия добавки с основой инструментального композита – КНБ.

При выборе добавок в ПСТМ нужно иметь в виду, что их введение не должно снижать физико-механических свойств инструментального композита.

Логично предположить, что в качестве соединений, вступающих в реакцию с элементами обрабатываемых материалов с выделением азота, могут выступать различные нитриды [6]. Анализ гаммы нитридов показал, что такой добавкой может быть нитрид кремния Si_3N_4 .

Методика исследований. В настоящей работе для спекания ПСТМ использовали: – порошки КНБ (марка КМ) различной зернистости от 2/1 до 14/10; – порошок нитрида кремния (производство фирмы «Штарк»: $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, 4 масс. % $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, 1 масс. % Si). Нитрид кремния вводился в микропорошок КНБ в количествах от 1,5 до 20 масс. %.

Процесс уплотнения и спекания ПСТМ исследовался для давления 7,7 ГПа, как в зависимости от температуры при фиксированном времени спекания (60 с), так и содержания исходного $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ при фиксированных времени (60 с) и температуре (1987 °С).

Продукты спекания и взаимодействия инструментального материала с обрабатываемым исследовались методом дифференциального термического (ДТА), рентгеновским, спектральным анализом, электронной микроскопией.

Для моделирования химического взаимодействия в зоне обработки применялись порошки cBN (7/5), Si_3N_4 («Шарк»), Nb, Fe (карбонильное, мелкая фракция), Ni (электролитический), Cr (электролитический), которые смешивались в разных смесях и пропорциях. Исходные смеси компонентов КНБ, Si_3N_4 с металлами нагревались в печи электросопротивления в атмосфере аргона до температур 1375 ± 25 °С. Дифференциальный термический анализ выполнен в установке ВДТА в атмосфере аргона, нагрев проводился в тиглях HfO_2 . Скорость нагрева составляла 70 град/мин. Предельная температура нагрева превышала температуру ликвидуса каждого образца, которую регистрировали во время отсутствия термических эффектов. Нагрев прекращался при 1450 ± 50 °С.

Работоспособность режущего инструмента оценивалась по результатам стойкостных экспериментов на токарно-винторезном станке ФТ-11.

В качестве обрабатываемых материалов использовались труднообрабатываемые сплавы: закаленная сталь ХВГ (50–55 HRC), отбеленный чугуны (72 HS), никелевые литейные ХН77ТЮР (HV 3,8 ГПа), ВЖЛ-2 (260 HB) и напыленное

покрытие на основе никеля ПГ-10Н-01 (55–58 HRC), твердый сплав группы ВК с $\text{Co} > 15\%$.

Для исследования процесса точения использовались проходные резцы CRDPR25×25 с механическим креплением режущих пластин RNMN 070300T, 120300T.

Исследование спекания ПСТМ. Зависимость размера областей когерентного рассеяния (ОКР) КНБ от времени спекания имеет широкий минимум в области 20–50 с, при котором ОКР уменьшаются до 8–10 нм, очевидно, в результате интенсивной пластической деформации, протекающей в структуре в условиях высоких давлений. При более высоких временах спекания наблюдается увеличение размеров ОКР, обусловленное развитием процессов первичной рекристаллизации в сильнодеформированной структуре. Моменту времени процесса 20 с соответствует также и момент достижения максимально плотного состояния керамики, которое остается неизменным при дальнейшем высокотемпературном воздействии. Сопоставление параметров напряженного состояния показывает, что основным фактором, который может привести к упрочнению структуры материала в результате термобарического воздействия при спекании керамики, является барьерный фактор, связанный с упрочняющей ролью границ зерен, как мощных препятствий для движущихся дислокаций.

Установлено также, что процесс спекания КНБ при высоком давлении в присутствии нитрида кремния сопровождается полиморфным превращением $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4 \rightarrow \beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. Данное обстоятельство, очевидно, является дополнительным фактором не только способствующим активации процесса спекания, но и свидетельствующим о появлении армирующей компоненты в самой связующей фазе.

Зависимость твердости керамики, полученной спеканием при 7,7 ГПа и 1987 °С шихты состава КМ7/5 + 10 масс. % $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, от времени спекания (рис. 1, а) имеет вид кривой с максимумом при 30–50 с процесса. Очевидно, этот максимум соответствует минимуму зависимости размера ОКР КНБ от времени t спекания и, следовательно, обусловлен высоким уровнем дисперсности структурных составляющих керамики, полученной при указанных параметрах термобарического воздействия. Отметим, что измерения твердости проводили на расстоянии 3 мм от их центра на плоской поверхности, т.к. наличие радиального градиента температур в ячейке высокого давления при спекании приводит к существенному изменению свойств полученного образца в зависимости от координаты точки индентирования (рис. 1, б).

Исследование влияния исходного размера зерна КНБ на твердость получаемого ПСТМ не выявило каких-либо существенных корреляций (рис. 1, в), что свидетельствует о преобладающем влиянии тонкой структуры КНБ в полученных образцах на формирование их физико-механических свойств. Вместе с тем, на твердость получаемого композита значительное влияние оказы-

вает содержание активирующей спекание добавки (рис. 1, г), локализованной в структуре в области межзеренных границ в качестве связующей фазы на основе $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

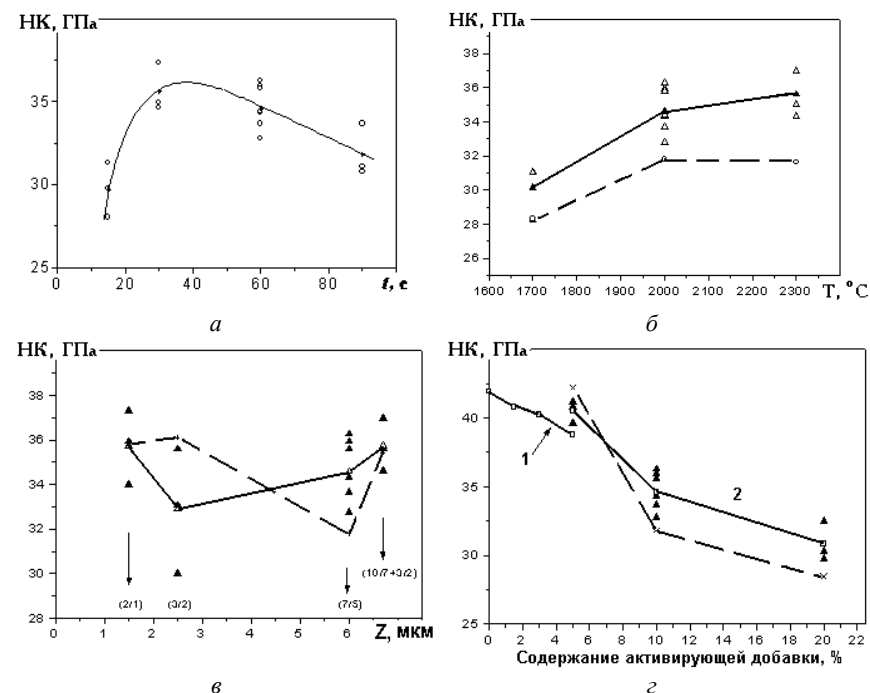


Рисунок 1 – Зависимость твердости по Кнупу ПСТМ: а – от времени спекания шихты состава КМ7/5 + 10 масс. % Si_3N_4 (черные точки соответствуют средним значениям твердости для однотипных образцов); б – от температуры спекания; в – от размера зерна спекаемого микропорошка КНБ; г – от содержания добавки (измерения проведены в центре образца и на удалении 3 мм от него; --- край; - - - центр)

Анализ результатов исследования влияние добавки нитрида кремния и условий спекания микропорошков КНБ на свойства образцов позволил разработать оптимальный технологический вариант получения ПСТМ в системе КНБ- Si_3N_4 , для применения в тяжелых условиях механической обработки. Основные свойства полученного композита приведены в таблице.

Нитрид кремния, локализуясь в структуре композита в области межзеренных границ как соединительная фаза, оказывает влияние на формирование в композите высоких механических свойств.

Таблица – Физико-механические свойства ПСТМ

Характеристика	Величина
Размер спекаемых частиц cBN, мкм	5–10
Плотность, г/см ³	3,45–3,46
Твердость по Виккерсу при нагрузке на индентор 150 Н, ГПа	41,3 ± 2,8
Трещиностойкость (инд. Виккерса, нагрузка 150 Н), МН·м ^{-3/2}	10,2 ± 0,2
Модуль сдвига, ГПа	381
Модуль Юнга, ГПа	859
Модуль всестороннего сжатия, ГПа	384
Коэффициент Пуассона, отн. ед.	0,127

Моделирование химического взаимодействия в зоне обработки. Результаты ДТА-исследования взаимодействия в системах КНБ-металл, Si₃N₄-металл представлены на рис. 2.

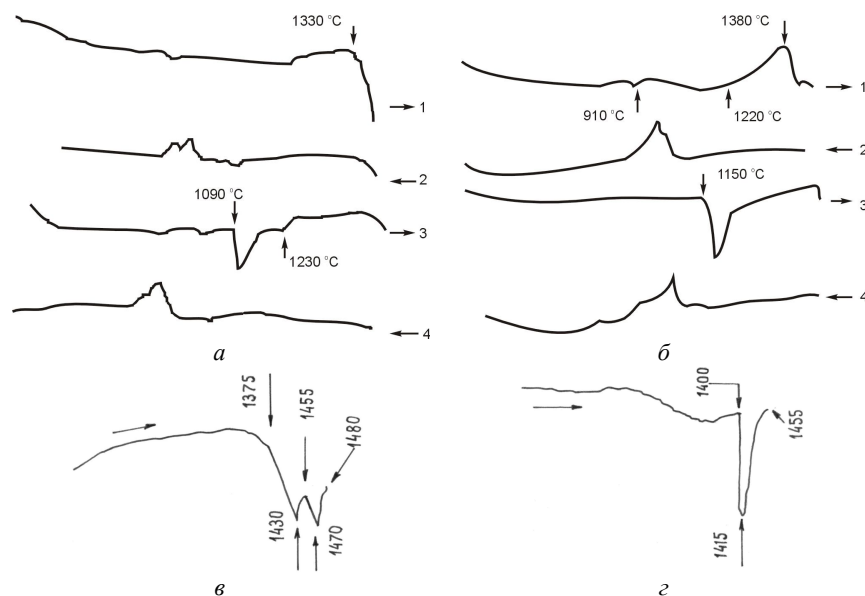


Рисунок 2 – Кривые ДТА смесей Ni-КНБ (а), Fe-КНБ (б), Ni-Si₃N₄ (в), Ni-Cr-Fe-Si₃N₄ (г): 1, 3 – нагрев; 2, 4 – охлаждение; 1, 2 – первый цикл нагрев–охлаждение; 3, 4 – второй цикл нагрев–охлаждение

Контактное плавление при реакциях с никелем и железом на воздухе отмечается при 1090 °C и 1150 °C соответственно. Плавление происходит при втором нагреве. При первом нагреве образуются бориды.

Взаимодействие в двухкомпонентных системах (КНБ-Ni) и (КНБ-Fe) с образованием боридов происходит при 1330 °C и 1380 °C соответственно.

При взаимодействии оксидов Fe₂O₃ и B₂O₃ температура контактного плавления снижается до 835 °C. При наличии в контакте оксидов никеля такой эффект не наблюдается.

Контактное плавление в системах Si₃N₄-Ni, Si₃N₄-Cr наблюдается при температурах 1375–1400 °C и 1630 °C соответственно. В системе Si₃N₄-Fe контактного плавления не выявлено до температуры плавления железа. Взаимодействие в двух- и трехкомпонентных системах Ni-Fe-Si₃N₄ и Ni-Cr-Fe-Si₃N₄ в твердом состоянии связано с образованием двойных низших силицидов, нитридных фаз и тройных соединений. Выделение газа происходит активно при твердофазных реакциях начиная с 1000 °C и интенсифицируется с повышением температуры до 1200 °C. Контактное плавление начинается при 1400 °C.

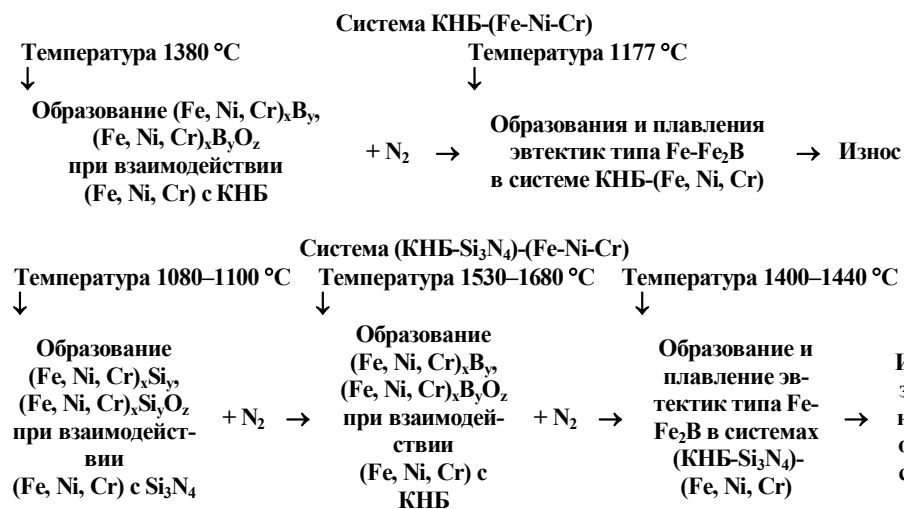


Рисунок 3– Модельная схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ

Термодинамический анализ химического взаимодействия КНБ с Ni и Fe [7], выполненный с учетом наличия давления в контакте между инструментальным и обрабатываемым материалами 5 ГПа, показал, что введение в контактную зону газообразного продукта взаимодействия (азота) с парциальным давлением 100 Па, повышает температуру взаимодействия на 150–300 °C.

На основании полученных результатов исследований разработана модельная схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ КНБ-Si₃N₄, при точении сплавов с Fe, Ni и Cr (рис. 3) [8].

Исследование работоспособности инструмента. Изнашивание инструмента имеет интегральный характер, который обусловлен механическими,

адгезионными, химическими и др. явлениями на контактных поверхностях инструмента. При этом, для изнашивания инструмента с ПСТМ на основе КНБ, повышение температуры образования в зоне резания боридов (оксидов) металлов, которое реализуется за счет введения в систему нитрида Si_3N_4 , и формирование на основе боридов (оксидов) легкоплавких эвтектик, их контактное плавление, имеет принципиальное значение, обеспечивая повышение износостойкости инструмента.

Эксперименты на стойкость показали, что при обработке Ni-сплавов наибольшую износостойкость имеют инструменты, оснащенные ПСТМ с содержанием добавки в количества 2–5 % (рис. 4). Указанному количеству Si_3N_4 отвечает скорость изнашивания режущего инструмента при точении без применения смазочно-охлаждающей жидкости покрытия ПГ-10Н-01 6,7–7,0 мкм/мин, а при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР – 54–68 мкм/мин со скоростями резания 180 м/мин и 270 м/мин соответственно. Близкие результаты получены при точении закаленной стали ХВГ (60–63 HRC) со скоростями резания 150–180 м/мин.

Сравнение показателей точения с охлаждением никелевых сплавов типа ВЖЛ-2 инструментами, оснащенными ПСТМ КНБ- Si_3N_4 и ПСТМ КНБ-(AlN , AlB_{12}), для которого при скоростях резания свыше 120 м/мин характерно интенсивное химическое взаимодействие в зоне резания, показывает, что обработка выполняется со скоростями резания 215–275 м/мин и 120–155 м/мин соответственно, а стойкость инструмента увеличивается в 3 раза.

Внешний вид изношенных резцов с ПСТМ КНБ- Si_3N_4 после точения (рис. 5) свидетельствует о том, что изнашивание инструмента в большинстве случаев обусловлено механическим разрушением материала инструментального композита, за счет усталостно-механического и адгезионного механизмов, а химическое взаимодействие на контактных поверхностях инструмента минимизировано: на неконтактных поверхностях инструмента вблизи изношенных участков нет следов жидкого продукта химического взаимодействия в зоне резания.

При обработке бочки валков из отбеленного чугуна стойкость резцов, оснащенных твердым сплавом ВК60М, керамикой ВК60, ПСТМ композит 10Д и ПСТМ КНБ- Si_3N_4 , составляет 5, 30, 60, 120 мин соответственно. Инструмент, оснащенный композитом КНБ- Si_3N_4 , позволяет обрабатывать 2–3 валка по бочке и ручьям. Скорость резания – черновая обработка 72 м/мин, чистовая – 86 м/мин. Стойкость резца – 125 мин. В сравнении с керамическим инструментом SN 100 (Германия), который используется для обработки отбеленных чугунов, скорость резания инструментом, оснащенным композитом КНБ- Si_3N_4 , выше в 2,9–3,4 раза.

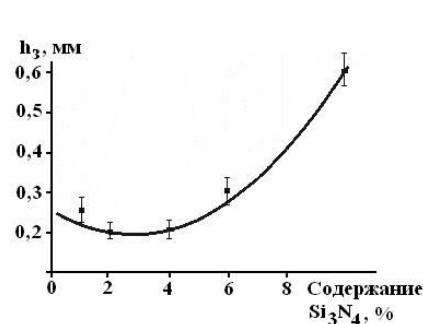


Рисунок 4 – Зависимость износа инструмента от содержания Si_3N_4 в ПСТМ при точении сплава ХН77ТЮР ($v = 250$ м/мин; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

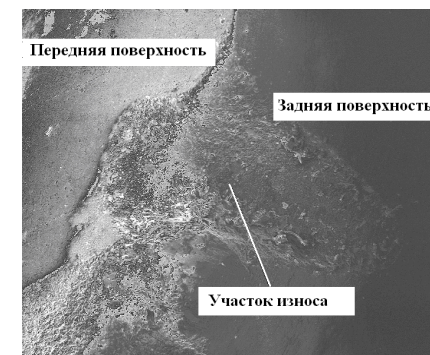


Рисунок 5 – Вид контактного участка инструмента после точения никелевого сплава типа ВЖЛ-2

Учитывая, что Fe, Ni и Co относятся к одной группе Периодической системы Менделеева, была проведена проверка возможностей инструментов при точении сплавов, которые содержат Co – твердых сплавов группы ВК ($\text{Co} > 15\%$). Инструмент, оснащенный композитом КНБ- Si_3N_4 , позволяет обработать 3 валка из твердого сплава по бочке и по 5 ручьям на каждом валке. Стойкость инструмента до 3-х раз превышает стойкость резцов из композиту 10. Скорость резания – 12–18 м/мин.

Соответственно конфигурационной модели вещества [9] высокие значения статистических весов атомных стабильных конфигураций (СВАСК) sp^3 -конфигурации Si_3N_4 и d^6 -конфигурации Fe обеспечивают низкую адгезионную активность на контактных поверхностях инструмента в процессе резания. Аналогичная картина имеет место для случая обработки сплавов с повышенным содержанием Cr (СВАСК d^5 -конфигурации 73 %), что актуально для инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, для которого хром является адгезионно активным металлом.

Таким образом, использование нитрида кремния в ПСТМ на основе КНБ способствует повышению эффективности режущих инструментов при обработке сталей и сплавов на основе Fe и сплавов с высоким содержанием Cr, за счет уменьшения интенсивности их изнашивания, что связано со снижением интенсивности химического и адгезионного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания.

Обработка сплавов на основе Ni сопровождается более высоким уровнем адгезионного взаимодействия, что обусловлено низким значением СВАСК d^5 -конфигурации (12 %) никеля. В этом случае повышение эффективности обработки связано с минимизацией интенсивности химического взаимодействия в зоне резания и ростом твердости материала режущего инструмента за счет оптимизации его химического состава и технологии получения.

Заключение. Эффективным направлением повышения работоспособности режущего инструмента с ПСТМ на основе КНБ является изменение состава его рабочего композита за счет введения в него составляющих, которые, без снижения механических свойств материала, минимизируют химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания.

Для оснащения режущего инструмента разработан ПСТМ на основе КНБ, содержащий нитрид кремния. Материал имеет высокие механические свойства, а также обеспечивает формирование в зоне резания азотсодержащей среды, что позволяет обрабатывать детали из труднообрабатываемых сплавов на основе Ni и Fe с высокой скоростью резания.

Список использованной литературы: 1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под. ред. Н. В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.; 2. Высокоскоростная обработка. High Speed Machining (HSM): Справ. – М.: Изд-во «ИТО», 2002. – 32 с.; 3. On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools / S. A. Klimenko, Yu. A. Mukovoz, V. A. Lyashko et al. // Wear. – 1992. – vol. 157. – P. 1–7.; 4. Chapter 1. Cutting Tools of Superhard Materials / S. A. Klimenko, Yu. A. Mukovoz, L. G. Polonsky // Advanced Ceramics Tool for Machining Application-2 / Edit by I. M. Low, X. S. Li. – Switzerland: Trans Tech Publications, 1996. – P. 1–66. 5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – 2006. – 316 с. 6. Контактное химическое взаимодействие в системах, содержащих BN, Si₃N₄, Ni, Cr, Fe / О. Г. Кулик, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина и др. // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (Серія “Г”). – К.: ІНМ НАН України, 2003. – С. 115–127. 7. Turkevich V. Z., Klimenko S. A., Kulik O. G. Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material-Fe(Ni)system // Transactions. – 1999. – vol. XXVIII, № 2. – P. 8–11. 8. Клименко С. А., Копейкина М. Ю. Концепция повышения износостойкости и производительности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип. 6. – С. 120–131. 9. Копейкина М. Ю. Повышение работоспособности лезвийного инструмента при точении труднообрабатываемых сплавов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип. 7. – С. 66–75.

Поступила в редколлегию 08.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / Pod. red. N. V. Novikova. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 555 s.; 2. Vysokoskorostnaja obrabotka. High Speed Machining (HSM): Sprav. – M.: Izd-vo «ITO», 2002. – 32 s.; 3. On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools / S. A. Klimenko, Yu. A. Mukovoz, V. A. Lyashko et al. // Wear. – 1992. – vol. 157. – P. 1–7.; 4. Chapter 1. Cutting Tools of Superhard Materials / S. A. Klimenko, Yu. A. Mukovoz, L. G. Polonsky // Advanced Ceramics Tool for Machining Application-2 / Edit by I. M. Low, X. S. Li. – Switzerland: Trans Tech Publications, 1996. – P. 1–66. 5. Sverhtverdye materialy. Po-lu-che-nie i primeneniye: V 6-i t. / Pod obwey red. N. V. Novikova. – K.: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2006. T. 5: Ob-ra-botka materialov lezvijnym in-strumentom / Pod red. S. A. Klimenko. – 2006. – 316 s. 6. Kon-taktnoe himicheskoe vzaimodejs-t-vie v sistemah, soderzhawih BN, Si₃N₄, Ni, Cr, Fe / O. G. Kulik, S. A. Klimenko, M. Ju. Kopejkina i dr. // Suchasni procesi mehanichnoi obrobki inst-strumentami z NTM ta jakost' po-verhni de-ta-lej mashin: Zb. nauk. prac' (Se-rija “G”). – K.: INM NAN Ukraïni, 2003. – S. 115–127. 7. Turkevich V. Z., Klimenko S. A., Kulik O. G. Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material-Fe(Ni)system // Transactions. – 1999. – vol. XXVIII, № 2. – P. 8–11. 8. Klimenko S. A., Kopejkina M. Ju. Konceptija povysheniya iznoso-toj-kosti i proizvoditel'nosti instru-menta, osnawennogo PSTM na osnove KNB // Prosesi mehanichnoi obrobki v ma-shinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. – Zhitomir: ZhDTU, 2009. – Vip. 6. – S. 120–131. 9. Kopejkina M. Ju. Povyshenie rabotosposobnosti lezvijnogo instrumenta pri tochenii trudnoobratyvaemyh splavov // Prosesi mehanichnoi obrobki v ma-shinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. – Zhitomir: ZhDTU, 2009. – Vip. 7. – S. 66–75.